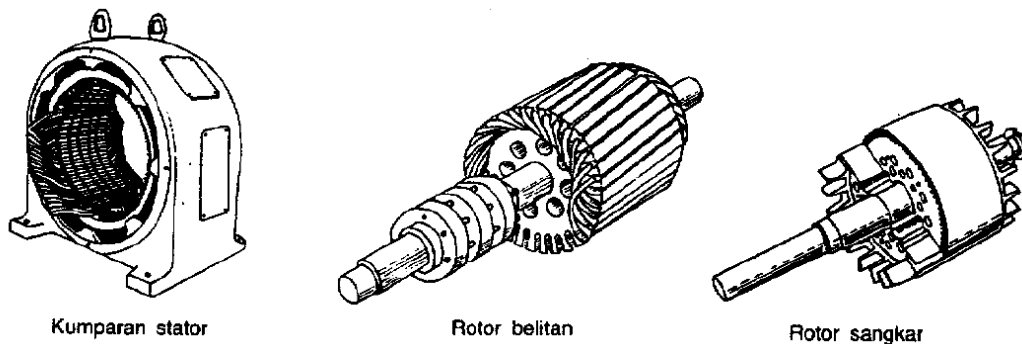


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor Induksi

Pengaplikasian motor induksi (*asynchronous*) khususnya motor induksi tiga fasa, sangatlah banyak diterapkan baik pada pembangkit listrik serta pada sektor industri kecil maupun besar. Keunggulan motor induksi dibandingkan jenis motor yang lain, yakni memiliki efisiensi yang tinggi, konstruksi yang kuat dan sederhana, mudah dan murah dalam perawatannya yang membuat motor induksi tiga fasa ini diminati [1].



Gambar 2.1 Jenis Motor Induksi [10]

2.1.1. Prinsip Kerja Motor Induksi

Berputarnya rotor pada motor induksi dapat terjadi karena adanya medan putar yang dihasilkan dalam kumparan statornya yang akan terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa. Medan putar terjadi ketika sumber tegangan AC tiga fasa dipasang pada kumparan dengan kecepatan yang dapat dirumuskan dengan persamaan 2.1 berikut : [10]

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (2.1)$$

dengan nilai :

- f = frekuensi
- P = pole
- n_s = kecepatan motor

Dari persamaan 2.1 tersebut dapat diketahui dalam mengontrol kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah nilai frekuensi dan nilai pole. Kecepatan putaran rotor pada motor induksi selalu lebih lambat daripada kecepatan medan stator [10]. Perbedaan kecepatan tergantung pada beban yang diberikan ke motor. *Slip* (S) merupakan perbedaan antara *synchronous speed* (n_s) dan *actual speed* (n_r) dari rotor, yang ditunjukkan dalam rotasi per detik atau prosentase dari *synchronous speed* yang dapat diketahui dengan persamaan 2.2 berikut :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \% \quad (2.2)$$

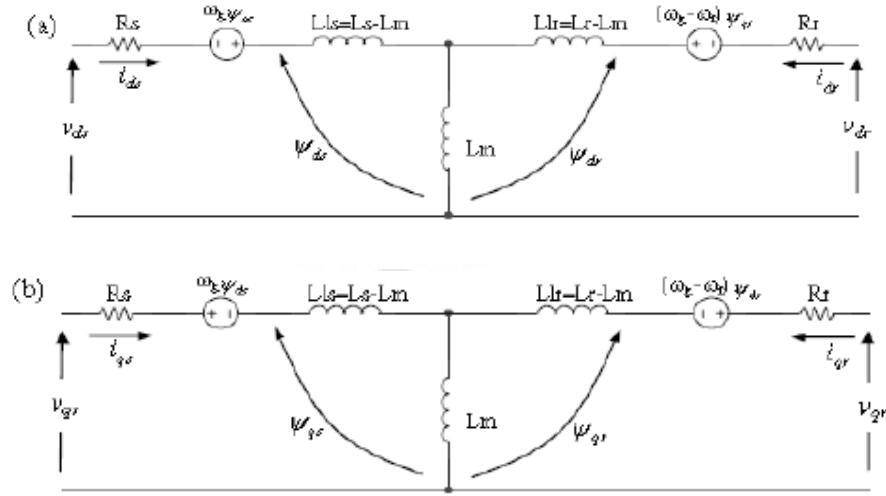
Terkadang, saat $n_s - n_r$ disebut *slip speed* sedangkan *rotor speed* adalah $n_r = n_s(1 - s)$. Berubahnya kecepatan rotasi motor induksi (n_r) mengakibatkan terjadinya perubahan nilai slip dari 100% pada saat *start* sampai 0% pada saat motor diam ($n_r = n_s$). Ketika rotor dalam posisi diam, maka frekuensi arus rotor akan sama dengan frekuensi sumbernya. Tetapi ketika rotor mulai berputar, kemudian frekuensi tergantung dari *relative speed* atau pada *slip speed*. Frekuensi arus rotor disimbolkan f_r sehingga didapat persamaan 2.3 berikut [10]:

$$n_s - n_r = \frac{120 f_r}{p} \text{ dan } n_s = \frac{120 f_s}{p} \quad (2.3)$$

2.1.2. Model d-q Motor Induksi Tiga Fasa

Secara konvensional dalam menganalisis suatu motor induksi tiga fasa digunakan model trafo dengan mengibaratkan tegangan sumber adalah sinusoidal dan dalam kondisi *steady state*. Dalam operasi nyata yang dilakukan didapatkan permasalahan pada tegangan sumber yang tidak sinusoidal dan terjadi perubahan beban. Oleh karena itu dibutuhkan model lain yang lebih fleksibel untuk menganalisis motor induksi yaitu dengan menggunakan model motor induksi dalam koordinat d-q. Model d-q dapat menganalisa motor induksi dalam kondisi : *transient*, *steady state*, dan perubahan karena beban [11]. Motor induksi sangat identik dengan transformator, dimana kumparan primer merupakan kumparan stator serta kumparan sekunder merupakan kumparan rotor. Dengan demikian, rangkaian ekuivalen pada motor induksi hampir sama seperti rangkaian ekuivalen

pada transformator. Rangkaian ekuivalen perfasa motor induksi dapat ditunjukkan oleh gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen d-q dinamik motor induksi (a) rangkaian d-axis, (b) rangkaian q-axis [11]

Dari diagram tersebut dapat diketahui persamaan tegangan motor induksi dengan dalam koordinat d-q, tegangan simetri dinyatakan oleh persamaan 2.4 sampai 2.7 berikut :

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (2.4)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (2.5)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_g - \omega_r) \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (2.6)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_g - \omega_r) \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (2.7)$$

persamaan untuk fluksi yang mencakup dalam kumparan adalah :

$$\lambda_{qs} = L_{is} i_{qs} + L_M (i_{qs} - i_{qr}) \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ds} = L_{is} i_{ds} + L_M (i_{ds} - i_{dr}) \quad (2.9)$$

$$\lambda_{qr} = L_{ir} i_{qr} + L_M (i_{qs} - i_{qr}) \quad (2.10)$$

$$\lambda_{dr} = L_{ir} i_{dr} + L_M (i_{qs} - i_{qr}) \quad (2.11)$$

persamaan untuk torkan elektromagnetik motor induksi dapat ditentukan dengan :

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (2.12)$$

persamaan dinamis dari motor induksi adalah :

$$T_e - B_m \omega_r - T_L = \frac{2J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.13)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r(t) = \omega_r(t) \quad (2.14)$$

dengan nilai :

- T_L = torka beban
- T_e = torka elektromagnetik
- J = momen inersia (kg.m²)
- P = jumlah kutub
- ω_r = kecepatan angular rotor (rad/detik)
- B_m = koefisien gesekan (N.m.detik/rad)
- θ_r = posisi sudut (rad)

Dari persamaan 2.4 sampai 2.14 dapat dinyatakan dalam bentuk matriks yang sederhana menjadi :

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega L_s & pL_M & -\omega L_M \\ -\omega L_s & R_s + pL_s & -\omega L_M & pL_M \\ pL_M & (\omega_g - \omega_r)L_M & R_r + pL_r & (\omega_g - \omega_r)L_r \\ -(\omega_g - \omega_r)L_M & pL_M & -(\omega_g - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

dengan $L_s = L_{is} + L_M$ dan $L_r = L_{ir} + L_M$ dimana L_s dan L_r adalah induktansi sendiri untuk stator dan rotor, serta L_M adalah induktansi bersama antara stator dan rotor sedangkan $p = \frac{d}{dt}$. Untuk lebih memudahkan dalam proses penghitungan tegangan dan arus dalam bentuk model d-q dan sebaliknya, dapat digunakan transformasi matriks kombinasi *Clarke-Park* [11] yakni :

$$K_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$K^{-1}_{dq0} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_0 \end{bmatrix} = K_{dq0} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \text{ dan } \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_0 \end{bmatrix} = K_{dq0} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

dengan nilai :

$$V_{as} = \sqrt{2}V \sin\omega t, V_{bs} = \sqrt{2}V \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \text{ dan } V_{cs} = \sqrt{2}V \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

2.2. Inverter

Inverter merupakan suatu rangkaian yang digunakan dalam mengubah sumber tegangan DC menjadi sumber tegangan AC dengan adanya pengaturan frekuensi. Bentuk gelombang *inverter* ideal adalah berbentuk gelombang sinusoida, sedangkan bentuk gelombang *inverter* dalam keperluan praktis tidak berbentuk sinusoida dan mengandung harmonisa, dimana hampir semua aplikasi *inverter* tegangan harmonik mempengaruhi performa sistem [10]. *Inverter* DC-AC biasanya dioperasikan dengan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) yang merupakan suatu teknik untuk mengontrol besarnya lebar pulsa (*duty cycle*). Teknik PWM digunakan untuk menjaga keluaran tegangan pada *inverter* pada nilai yang dibutuhkan yang terlepas dari keluaran beban. Pada *inverter* konvensional, perubahan nilai keluaran tegangan tergantung pada perubahan nilai beban sehingga untuk meniadakan perubahan tersebut dengan mengubah lebar pulsa yang memberikan nilai keluaran konstan [2].

2.2.1. Multilevel Inverter

Multilevel inverter adalah sistem konversi daya yang terdiri dari perangkat semikonduktor dan kapasitor apabila digunakan secara sistematis menghasilkan gelombang tegangan *multilevel* dengan frekuensi, fasa dan amplitud terkontrol [3]. Topologi dari *multilevel inverter* diklasifikasikan menjadi tiga tipe diantaranya adalah *flying capacitor*, *cascaded h-bridge multilevel inverter*, dan *diode clamped*. *Cascaded h-bridge* (CHB) *multilevel inverter* merupakan topologi yang paling populer yang digunakan pada *drive* tegangan menengah yang berdaya

tinggi [4]. Tegangan keluaran AC dari setiap tingkatan *inverter* jembatan penuh yang berbeda dihubungkan secara seri sehingga didapatkan gelombang tegangan yang merupakan penjumlahan dari seluruh keluaran *inverter*. Jumlah dari tingkat tegangan keluaran untuk setiap fasa pada CHB *multilevel inverter* dapat dirumuskan dengan persamaan 2.16 berikut :

$$m = 2H + 1 \quad (2.16)$$

dengan nilai :

$$\begin{aligned} m &= \text{level/tingkatan tegangan keluaran} \\ H &= \text{jumlah inverter h-bridge} \end{aligned}$$

5-level cascaded h-bridge multilevel inverter terdiri atas dua buah *inverter* jembatan penuh yang disusun secara seri dengan memasukkan dua sumber DC. Pada setiap fasa dari 5-level CHB membutuhkan delapan pola PWM untuk menyalakan *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) secara bergantian. Pada setiap *inverter* jembatan penuh menghasilkan tiga *level* keluaran, yaitu +Vdc, 0, -Vdc [4], maka untuk 5-level didapatkan dengan menjumlahkan kedua keluaran tegangan *inverter* jembatan penuh yang ditunjukkan oleh persamaan 2.17 berikut :

$$V_{out} = V_1 + V_2 \quad (2.17)$$

dan analisis fourier untuk bentuk gelombang tersebut dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.18 dengan nilai $n = 1, 3, 5, 7, \dots$:

$$H(n) = \frac{4}{\pi n} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_s)] \quad (2.18)$$

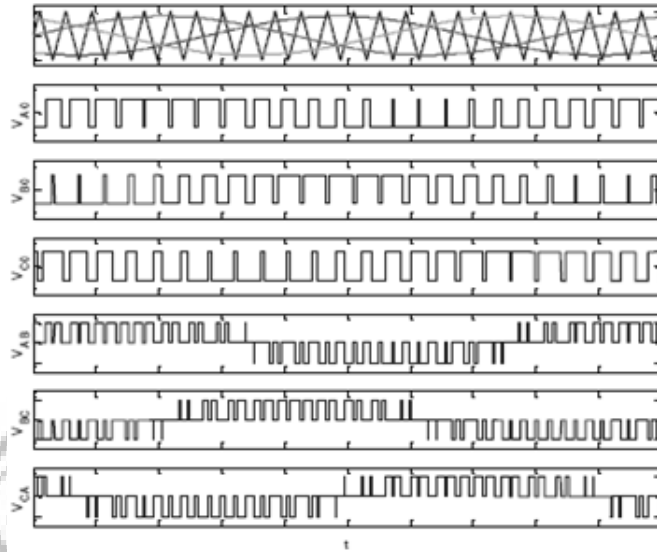
2.2.2. Sine-Triangle Pulse Width Modulation (SPWM)

Pada metode sinus-segitiga untuk m-tingkatan *inverter* a-fasa, siklus akan dibandingkan dengan m-1 gelombang segitiga. Aturan dari pensaklaran ditunjukkan oleh persamaan 2.19 dan 2.20 berikut [12]:

$$S_{ai} = f(x) = \begin{cases} 1, & d_{am} > tri \\ 0, & \text{elsewise} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$S_a = \sum_{i=1}^{n-1} S_{ai} \quad (2.20)$$

salah satu metode yang menjelaskan modulasi sumber tegangan di ilustrasikan dari perpotongan sinyal modulasi (siklus) dengan gelombang segitiga.



Gambar 2.3 Gelombang SPWM *Inverter* Tiga Fasa [12]

Frekuensi dari $v_{tri} = fs$ sama dengan PWM frekuensi dan frekuensi dari $v_{control} = fs$ sama dengan frekuensi dasar.

$$v_{AB} = V_{A0} - V_{B0} \quad (2.21)$$

$$v_{BC} = V_{B0} - V_{C0} \quad (2.22)$$

$$v_{CA} = V_{C0} - V_{A0} \quad (2.23)$$

perbandingan modulasi amplitudo (m_a) dirumuskan persamaan 2.24 berikut :

$$m_a = \frac{\text{puncak amplitudo } v_{control}}{\text{amplitudo } v_{tri}} = \frac{\text{nilai puncak } (V_{A0})_1}{V_{dc}/2} \quad (2.24)$$

dengan $(V_{A0})_1$ = bagian frekuensi dasar dari (V_{A0})

perbandingan modulasi frekuensi (m_f) bisa dirumuskan persamaan 2.25 berikut :

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.25)$$

dengan :

f_s = frekuensi PWM

f_1 = frekuensi dasar

m_f harus bilangan ganjil karena jika tidak bilangan ganjil maka akan terdapat harmonisa pada tegangan keluaran dan harus kelipatan tiga untuk *inverter* PWM tiga fasa.

Skema modulasi didasarkan pada sinyal pembawa, untuk *multilevel inverter* pada umumnya digolongkan menjadi dua kategori : *phase-shifted* dan *level-shifted modulation*. Kedua skema modulasi ini dapat diaplikasikan pada *cascaded h-bridge multilevel inverter*. THD dari *phase-shifted* modulasi lebih besar dari *level-shifted* modulasi, oleh karena itu *level-shifted* modulasi betul-betul di pertimbangkan. Terdapat tiga teknik pemucuan PWM yang dapat digunakan dengan hubungan antar fasa yang berbeda untuk *level-shifted multicarrier* modulasi [12]:

1. *In-phase disposition* (IPD), dimana semua gelombang pembawa berada dalam fasa yang sama.
2. *Phase opposition disposition* (POD), dimana semua gelombang sinyal pembawa diatas referensi nol berada dalam fasa yang sama dan dibawah nol berbeda 180° dari fasa awal.
3. *Alternate phase opposition disposition* (APOD), dimana setiap gelombang pembawa berbeda fasa 180° dengan pembawa lainnya.

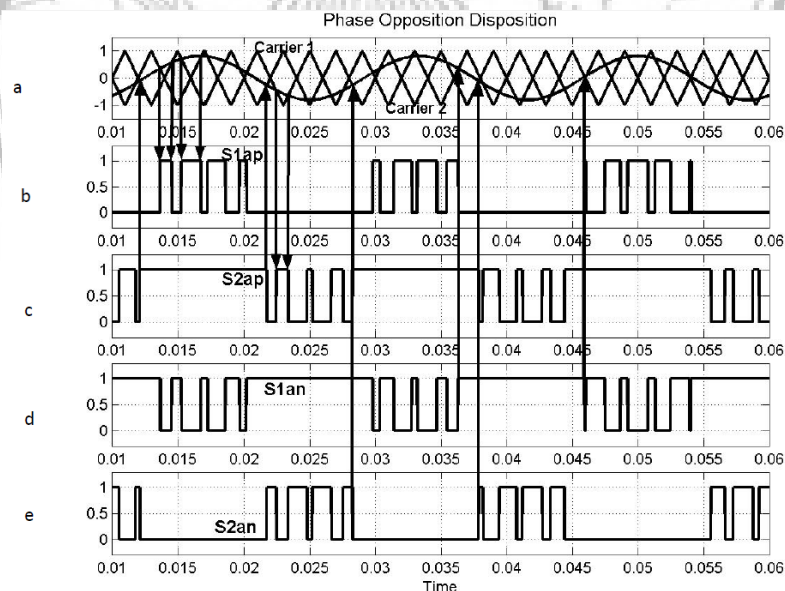
M-tingkatan *cascaded h-bridge multilevel inverter* menggunakan skema modulasi *level-shifted* dengan jumlah sinyal pembawa yang butuhkan adalah (m-1) sinyal pembawa segitiga, semuanya memiliki frekuensi dan amplitud yang sama. Pada (m-1) sinyal pembawa segitiga cenderung tegak seperti berhimpitan.

2.3. In-Phase Disposition Pulse Width Modulation (IPD PWM)

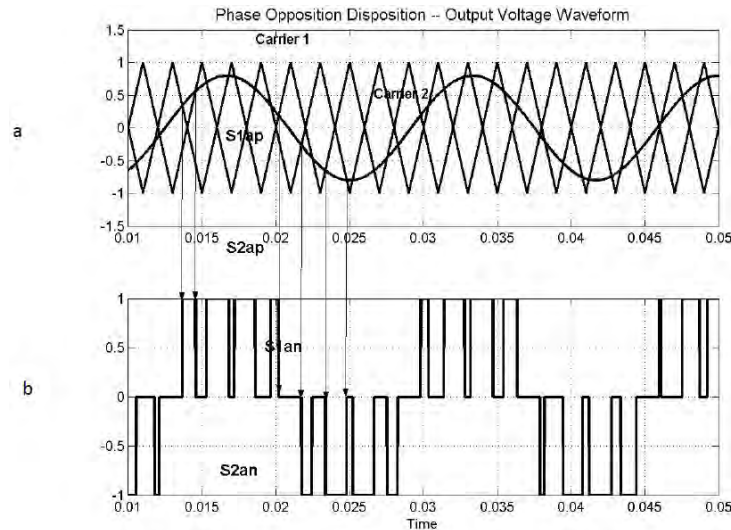
In-phase disposition pulse width modulation (IPD PWM) merupakan salah satu teknik pemucuan yang memiliki sudut fasa sama pada setiap sinyal segitiga pembawa. Gambar 2.4 menggambarkan metode sinus-segitiga untuk 3-tingkatan *inverter* akan terdapat dua sinyal segitiga (m-1). Sinyal modulasi dari setiap fasa akan dibandingkan dengan dua sinyal segitiga. Aturan untuk metode IPD PWM, ketika jumlah dari tingkatan $m = 3$ adalah [12]:

1. $m - 1 = 3 - 1 = 2$, maka terdapat 2 gelombang pembawa dimana semua gelombang pembawa berada dalam sudut fasa yang sama.
2. *Inverter* akan berubah ke $(+V_{dc}/2)$ saat gelombang dasar kurang dari kedua gelombang pembawa.
3. *Inverter* akan berubah menjadi 0 (nol) saat sinyal referensi lebih besar dari gelombang sinyal pembawa sisi bawah tetapi kurang dari sisi atas gelombang sinyal pembawa.
4. *Inverter* akan berubah ke $(-V_{dc}/2)$ saat sinyal referensi kurang dari kedua gelombang sinyal pembawa.

Gambar 2.4 merupakan pola *switching* yang dihasilkan oleh skema *carrier-based* PWM. Pada skema PWM dimana ada dua sinyal segitiga, jarak sinyal segitiga bagian atas dari 1 ke 0 dan jarak sinyal segitiga bagian bawah dari 0 ke -1. Sama seperti m-tingkatan inverter, $(m-1)$ sinyal segitiga digunakan dan nilai tiap puncak ke puncak adalah $2/(m-1)$. Oleh karena itu besarnya sinyal segitiga yang paling atas nilainya dari 1 ke $(1-2/(m-1))$, gelombang pembawa kedua dari $(1-4/(m-1))$, dan sinyal segitiga yang paling bawah dari $(2-2/(m-1))$ ke -1. Pada gambar 2.5 bisa dilihat simulasi dari *carrier-based* skema PWM menggunakan *in-phase disposition* (IPD).



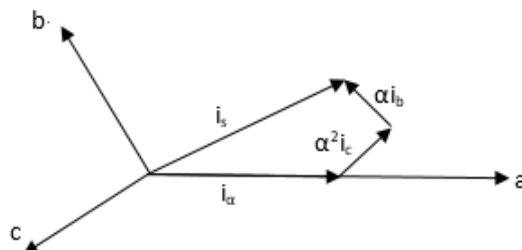
Gambar 2.4 Pola *Switching* IPD *Carrier-Based* PWM (a) 2 sinyal segitiga dan sinyal modulasi (b) S_{1ap} (c) S_{2ap} (d) S_{1an} (e) S_{2an}



Gambar 2.5 Simulasi dari skema *carrier-based* PWM menggunakan IPD
 (a) Sinyal Modulasi dan gelombang fasa didalam sinyal pembawa (b)
 Tegangan keluaran fasa “a” [12]

2.4. Pengaturan Vektor

Pada dasarnya pengaturan vektor adalah mentransformasikan sistem tiga fasa kerangka acuan tetap (a, b, c) diubah kedalam elemen dua fasa kerangka acuan tetap (α , β), dan akan diubah kembali menjadi elemen dua fasa kerangka acuan bergerak (d , q) [5]. Tegangan, arus dan fluks tiga fasa pada motor AC dapat dianalisa dengan menggunakan kompleks ruang vektor. Dengan mengansumsikan bahwa i_a , i_b , i_c merupakan arus dari masing-masing fasa pada bagian stator motor induksi, dimana (a, b, c) adalah sistem tiga fasa yang menggambarkan sinusoida tiga fasa. Kerangka acuan tiga koordinat ditunjukkan pada gambar 2.6 yang kemudian dari sistem tiga koordinat akan ditransformasikan menjadi sistem *time invariant* dua koordinat.



Gambar 2.6 Kerangka Acuan Tetap 3 Koordinat

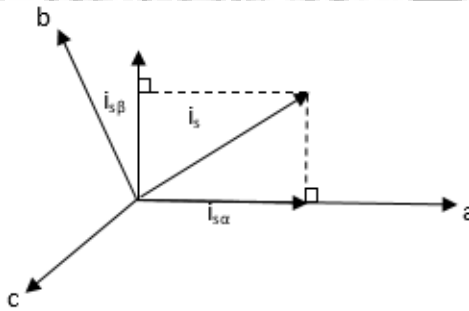
Perubahan sistem tiga koordinat menjadi sistem *time invariant* dua koordinat dapat dipisahkan kedalam dua langkah :

- Sistem (a, b, c) diubah menjadi sistem (α , β) dengan menggunakan Transformasi *Clarke*.
- Sistem (α , β) diubah menjadi sistem (d, q) dengan menggunakan Transformasi *Park*.

2.4.1.(a, b, c) menjadi (α , β) (Transformasi *Clarke*)

Ruang vector dapat dipresentasikan dalam dua sumbu tegak lurus (α , β), dengan asumsi bahwa sumbu a dan sumbu α mempunyai arah vector yang sama seperti pada gambar 2.7 dari proyeksi tiga fasa menjadi dua fasa dimensi tegak lurus (α , β) dapat dirumuskan dengan persamaan 2.23 berikut :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$



Gambar 2.7 (a, b, c) menjadi (α , β) (Transformasi *Clarke*)

Rumus untuk arus pada motor induksi tiga fasa dalam bentuk transformasi clarke dua fasa (α dan β) dinyatakan oleh persmaan 2.24 dan 2.25 berikut :

$$i_{\alpha} = i_a \quad (2.24)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (2.25)$$

dan rumus untuk tegangan oleh dinyatakan persamaan 2.26 dan 2.27 berikut :

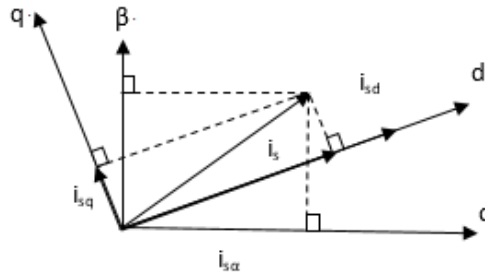
$$V_{\alpha} = V_a \quad (2.26)$$

$$V_{\beta} = \frac{2V_a + V_a}{\sqrt{3}} \quad (2.27)$$

2.4.2. (α, β) menjadi (d, q) (Transformasi Park)

Sedangkan dalam mempresentasikan kerangka acuan tetap (α, β) kedalam kerangka acuan bergerak (d, q) , dapat digunakan transformasi park yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Dari proyeksi sistem dua dimensi tegak lurus (α, β) menjadi sistem dua dimensi bergerak (d, q) dapat dirumuskan dengan persamaan 2.28 berikut :

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$



Gambar 2.8 (α, β) menjadi (d, q) (Transformasi Park)

Rumus untuk arus pada motor induksi tiga fasa dalam bentuk transformasi park $(d$ dan $q)$ dinyatakan oleh persamaan 2.29 dan 2.30 berikut :

$$i_d = i_a \quad (2.29)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{3}} V_c \quad (2.30)$$

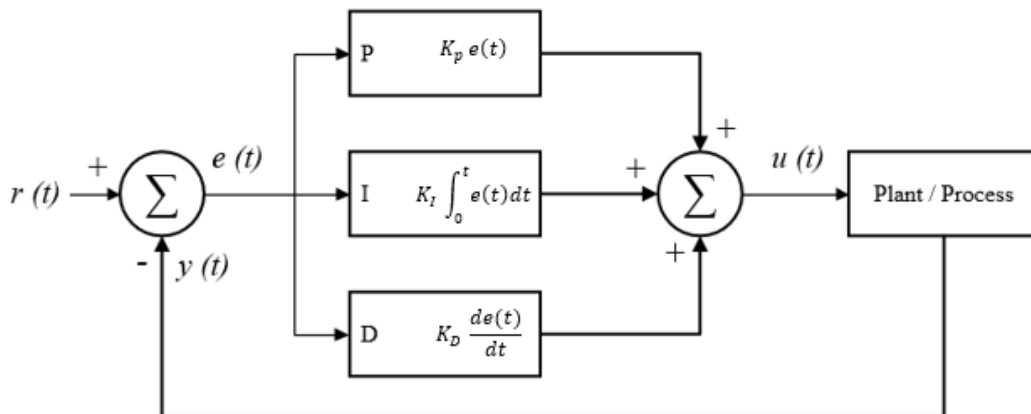
dan rumus untuk tegangan dinyatakan oleh persamaan 2.31 dan 2.32 berikut :

$$V_d = V_a \quad (2.31)$$

$$V_q = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{bc} \quad (2.32)$$

2.5. Kontroller *Proportional Integral Derivative* (PID)

Kontroller *Proportional-Integral-Derivative* (PID) merupakan Kontroller yang digunakan dalam menentukan nilai presisi suatu sistem instrumentasi dengan adanya karakteristik berupa umpan balik pada sistem. Dimana karakteristik dari Kontroller P yaitu memperbaiki *rise time* dan *settling time*, menambah *overshoot*, dan mengecilkan *steady state error*. Kontroller I memiliki spesifikasi menambah kesetabilan, dan menghapuskan *steady state error*. Kontroller D mencerminkan perubahan penyimpangan sinyal, memperkenalkan sinyal koreksi sebelum penyimpangan nilai sinyal menjadi lebih besar dan dapat mempercepat respon sistem untuk mengurangi pengaturan waktu transien. Dengan demikian, nilai K_p dikecilkan agar mengatasi *overshoot* melampaui. Nilai $K_i > K_p$ karena untuk menghilangkan *steady state error*.



Gambar 2.9 Blok Diagram Kontroller PID

persamaan Kontroller PID dapat dirumuskan dengan persamaan 2.33 berikut :

$$mv(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.33)$$

dengan nilai :

$mv(t)$ = output dari pengontrol PID atau manipulated variable

K_p = parameter Proporsional

T_i = parameter Integral

T_d = parameter Detivatif

$e(t)$ = *error* (selisih antara *set point* dengan *level* aktual).

persamaan Kontroller PID diatas dapat dituliskan juga dengan persamaan 2.34 berikut :

$$mv(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.34)$$

persamaan PID dalam bentuk *discrete transfer function* dapat ditulis dengan persamaan 2.35 berikut :

$$\frac{U[z]}{E[z]} = K_p + K_i \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} + K_d \frac{z-1}{zT_s} \quad (2.35)$$

Persamaan PID dalam bentuk *discrete transfer function* digunakan untuk mempermudah proses *tunning* yang menggunakan algoritma. Pada Kontroller PID terdapat tiga parameter k_p , k_i , serta k_d dimana setiap parameter tersebut memiliki kelebihan serta kekurangan masing-masing. Respon setiap parameter ini dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2 Respon Kontrol PID Terhadap Perubahan Parameter

<i>Closed-Loop Response</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Setting Time</i>	<i>SS Error</i>
K_p	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Small change</i>	<i>Decrease</i>
K_i	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Increase</i>	<i>Eliminate</i>
K_d	<i>Small change</i>	<i>Decrease</i>	<i>Decrease</i>	<i>Small change</i>

Pengaplikasian algoritma dalam penentuan parameter Kontroller PID untuk memperoleh kontroer yang diinginkan dan efisien telah banyak dilakukan seperti

- Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroller PID Berbasis Genetic Algorithm.
- Optimasi Parameter Kontroller PID Berbasis Algoritma Particle Swarm Optimization untuk Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fase.
- Kontrol Kecepatan Motor Induksi Menggunakan PID-Fuzzy.

2.6. Flower Pollination Algorithm (FPA)

Penyerbukan bunga adalah proses yang menarik yang terjadi di alam. Karakteristik evolusionernya dapat digunakan untuk merancang algoritma optimasi baru. Algoritma FPA ini terinspirasi oleh proses penyerbukan bunga. Dalam banyak aplikasi desain di dalam bidang teknik dan industri, perlu dilakukan proses untuk menemukan solusi optimal pada masalah tertentu di bawah kendala yang sangat kompleks. Masalah optimasi yang dibatasi seperti itu seringkali bersifat *non-linier*. Kebanyakan pengoptimalan konvensional tidak berjalan dengan baik untuk masalah dengan sifat *non-linier* dan *multimodalitas*. Kecenderungan saat ini adalah menggunakan algoritma *metaheuristik* yang diilhami alam untuk mengatasi masalah yang sulit tersebut, dan telah ditunjukkan bahwa metaheuristik sangat efisien.

Menurut Xan-She Yang, selaku penemu metode FPA mengemukakan bahwa *Flower Pollination Algorithm* (FPA) atau algoritma penyerbukan bunga merupakan salah satu algoritma *metaheuristic* yang dapat menggantikan metode klasik dan dianggap mampu menunjukkan hasil simulasi yang lebih efisien dari pada *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Genetic Algorithm* (GA) serta algoritma penyerbukan bunga ini digunakan untuk memecahkan patokan desain *non-linier*, yang menunjukkan tingkat konvergensi hampir eksponensial [6].

Proses penyerbukan bunga berbasis broker atau agen penyerbukan terbagi menjadi dua, yaitu:

- Penyerbukan biotik : penyerbukan yang terjadi karena bantuan penyerbuk atau gen biotik, seperti serangga atau hewan lain yang bergerak atau membawa serbuk sari.
- Penyerbukan abiotik : penyerbukan yang terjadi tanpa bantuan penyerbuk atau organisme lainnya, namun dibantu oleh agen abiotik, seperti angin dan air.

Penyerbukan dapat diperoleh dengan penyerbukan sendiri atau penyerbukan silang. Penyerbukan silang atau allogami adalah penyerbukan terjadi bila serbuk

sari dari tanaman berbeda. Sementara penyerbukan sendiri adalah pemupukan bunga atau bunga yang berbeda dari tanaman yang sama .

2.6.1. Karakteristik *Flower Polliation Algorithm* (FPA)

Karakteristik algoritma penyerbukan bunga, konstanta bunga dan perilaku penyerbuk sebagai berikut ini [6]:

1. Penyerbukan biotik dan penyerbukan silang dipandang sebagai penyerbukan global dengan organisme penyerbuk pembawa serbuk sari yang melakukan gerakan *Lévy Flights*.
2. penyerbukan abiotik dan penyerbukan sendiri dipandang sebagai penyerbukan lokal.
3. *flower constancy* dipandang sebagai peluang reproduksi yang proporsional dengan kesamaan dari dua bunga yang terlibat.
4. penyerbukan lokal dan global diatur oleh peluang berpindah.

Dari pembahasan diatas dan karakteristik ideal, pada *flower pollination algorithm* terdapat dua langkah kunci, yaitu penyerbukan global dan penyerbukan lokal. Penyerbukan lokal terjadi ketika penyerbukan dengan serbuk sari yang berasal dari bunga yang sama atau bunga berbeda pada satu taman. Penyerbukan global terjadi apabila gamet serbuk sari yang dibawah oleh penyerbuk seperti serangga dapat mencapai jarak yang jauh dan bergerak dengan kisaran waktu yang lama.

Proses ini bisa menghasilkan solusi yang paling optimal yang direpresentasikan dengan aturan pertama, ditambah dengan fenomena *flower constancy* dapat direpresentasikan secara matematis. Persamaan yang digunakan saat kondisi penyerbukan global yaitu ketika nilai probabilitas (p) lebih besar dari nilai random dapat dirumuskan dengan persamaan 2.36 berikut:

$$x_t^{i+1} = x_t^i + L(g^* - x_t^i) \quad (2.36)$$

berikut adalah fungsi untuk jarak penyerbukan bunga :

$$L \sim \lambda \Gamma(\lambda) \frac{\sin(\pi \gamma / 2)}{\pi} \frac{1}{S^{1+\lambda}}, (S \gg S_0 > 0) \quad (2.37)$$

$$S = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (2.38)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \beta 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right\} 1/\beta \quad (2.39)$$

$$N(0,1) = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (2.40)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} - (\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2)}{N-1}} \quad (2.41)$$

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty t^{n-1} e^{-t} \quad (2.42)$$

dan untuk persamaan yang digunakan saat kondisi penyerbukan lokal yaitu ketika nilai probabilitas (p) lebih kecil dari nilai random dapat dirumuskan dengan persamaan 2.43 berikut :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (2.43)$$

dengan nilai :

- x_t^i = Serbuk sari i atau vektor solusi i pada iterasi t .
- g^* = Solusi terbaik diiterasi yang sedang berlangsung.
- L = Jarak penyerbukan oleh serangga.
- $\Gamma(n)$ = fungsi gamma standar.
- λ = parameter ukuran penyerbukan.
- γ = ukuran *learning rate* untuk operasi optimasi dengan FPA.
- S = *symmetric Levy stable distribution*.
- u = distribusi normal $N(0,1) * \sigma u$.
- v = distribusi normal $N(0,1)$.
- β = beta dengan nilai 0 sampai dengan 2.
- σ_u = sigma u .
- N = banyaknya nilai yang akan dicari standard deviasinya.
- x_i = data berdistribusi normal indeks ke i .
- \bar{x} = rata-rata nilai berdistribusi normal.
- n = nilai yang akan dihitung fungsi gamma nya.
- x = variabel peubah.

$e = 2.71828$.

$\varepsilon =$ distribusi seragam $[0,1]$.

$x_j^t =$ solusi vektor j pada iterasi t .

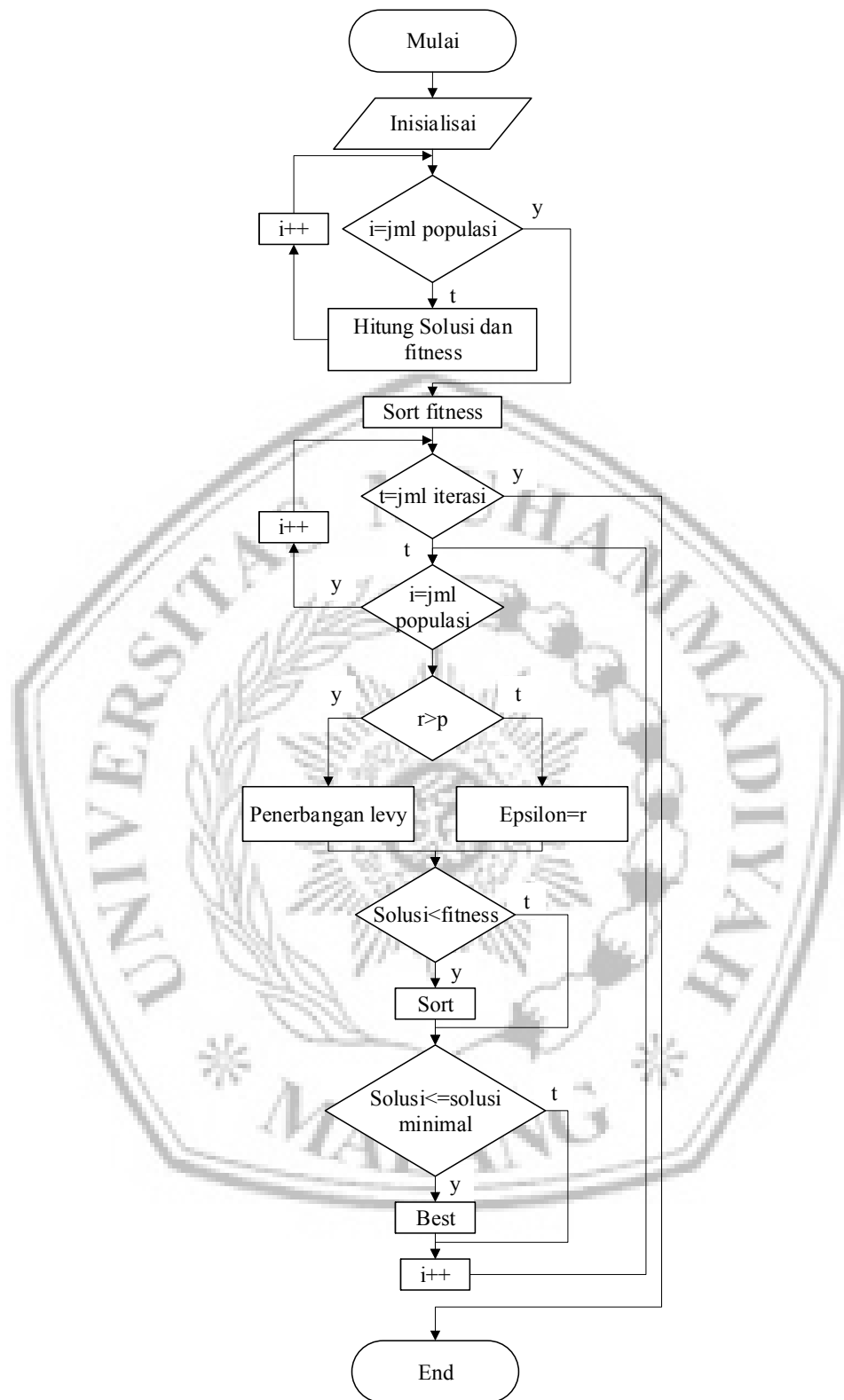
$x_k^t =$ solusi vektor k pada iterasi t .

Pada proses penyerbukan bunga terdapat parameter yang akan digunakan pada metode FPA antara lain [12] :

1. Jumlah populasi bunga yang ada di taman.
2. Kemungkinan serangga berpindah (*probability switch*).
3. Parameter iterasi.
4. Dimensi.
5. Batas atas dan Batas bawah parameter.

Pada beberapa studi kasus yang telah dilakukan, pengaplikasian algoritma penyerbukan bunga (*Flower Pollination Algorithm*) ini diterapkan pada beberapa penelitian seperti:

- Optimal Power Flow Using Flower Pollination Algorithm - A Case Study of 500 kV Java-Bali Power System.
- Performance Analysis of Flower Pollination Algorithm Optimization PID Controller for Wind-PV-SMES-BESS-Diesel Autonomous Hybrid Power System.
- Application of Flower Pollination Algorithm to Parameter Identification of DC Motor Model.
- Optimisasi PID pada Sistem Mesin Tunggal Terpasang STATCOM dengan Algoritme Flower Pollination.



Gambar 2.10 Diagram *Flowchart* Optimasi FPA [9]